

风机变流器故障引发电网电能质量扰动的综合治理与检修技术

史豪杰

新疆龙源新能源有限公司, 新疆 乌鲁木齐 830000

DOI:10.61369/ME.2026070030

摘 要 : 随着风电并网规模持续扩大, 风电变流器作为风电机组与电网衔接的核心电力电子设备, 其稳定运行直接决定电网电能质量与风电并网安全性。变流器长期处于变风速、变负荷、高低温交替的复杂工况下, 极易出现功率模块损坏、直流侧电压异常、控制策略失准、传感器故障等问题, 进而引发电网谐波畸变、电压波动与闪变、三相不平衡、电压骤升骤降等电能质量扰动问题, 严重威胁区域电网稳定运行与电力设备安全。本文系统分析风电变流器典型故障类型、故障诱发电网电能质量扰动的机理, 针对性提出源头防控、过程抑制、末端治理的综合治理方案, 同时优化适配现场场景的精细化检修技术, 结合工程故障案例验证技术方案的可行性与实用性, 为风电场电能质量管控、变流器故障运维检修提供技术参考。

关 键 词 : 风电变流器; 设备故障; 电能质量扰动; 综合治理; 检修技术

Comprehensive Management and Maintenance Technology for Power Grid Power Quality Disturbances Induced by Fan Converter Failures

Shi Haojie

Xinjiang Longyuan New Energy Co., Ltd., Urumuqi, Xinjiang 830000

Abstract : As the scale of wind power integration into the grid continues to expand, wind power converters—serving as the core power electronic devices that bridge wind turbines to the grid—play a pivotal role in ensuring the stable operation of the grid's power quality and the safety of wind power integration. These converters operate under complex, long-term conditions—including varying wind speeds, fluctuating loads, and alternating high-and low-temperature environments—which can easily lead to issues such as power module failure, DC-side voltage anomalies, improper control strategy implementation, or sensor malfunction. Such failures can subsequently induce power quality disturbances—such as grid harmonic distortion, voltage fluctuations and flicker, three-phase imbalance, or sudden voltage surges or drops—thereby posing a serious threat to the stable operation of regional power grids and the safety of electrical equipment. This paper systematically analyzes the typical fault types encountered in wind power converters and the mechanisms by which these faults trigger power quality disturbances in the grid. It proposes a comprehensive management approach encompassing root-cause prevention and control, process-based mitigation, and end-point remediation, while also optimizing and adapting refined maintenance techniques to specific field conditions. Through the analysis of real-world engineering fault cases, the paper verifies the feasibility and practicality of these technical solutions, providing a valuable technical reference for power quality management and converter fault diagnosis and maintenance in wind farms.

Keywords : wind power converter; equipment fault; power quality disturbance; comprehensive mitigation; maintenance technology

引言

新能源风电是我国新型电力系统建设的核心清洁能源, 凭借资源储量丰富、低碳环保、技术成熟等优势, 并网装机容量逐年攀升。风电变流器承担着电能变换、功率调节、并网适配的核心功能, 是风电并网系统的关键枢纽设备。相较于传统火电设备, 风电变流器属于高频工作的电力电子装置, 耐受工况冲击能力较弱, 长期运行中受风速随机波动、电网电压扰动、环境温湿度变化、设备老化等多重

因素影响，故障发生率居高不下。

变流器单次微小故障即可引发链式电能质量扰动，不仅会导致风电机组出力波动、发电效率下降，还会造成电网谐波超标、电压稳定性劣化，严重时引发机组脱网、区域电网振荡等安全事故。当前多数风电场存在重发电、轻运维的问题，对变流器故障诱发的电能质量扰动机理认知不足，治理手段单一、检修流程粗放，故障排查效率低、重复故障率高，难以满足新型电力系统对风电并网电能质量的高标准要求^[1]。因此，深入研究变流器典型故障特征、电能质量扰动规律，构建系统化综合治理体系与标准化检修技术体系，对提升风电场运维水平、保障电网安全稳定运行具有重要工程意义。

一、风电变流器典型故障类型及成因

风电变流器分为机侧变流器与网侧变流器，核心组成包括功率 IGBT 模块、直流母线电容、电压电流传感器、驱动电路、控制系统及制动单元等，各部件故障特征与诱发因素存在明显差异，结合现场运维数据，典型故障可分为四大类。

一是功率模块开路与击穿故障。IGBT 功率模块是变流器电能变换的核心部件，长期高频开关工作会产生大量损耗热量，若散热风扇卡顿、散热风道积尘、散热硅脂老化，会导致模块温度过高，引发绝缘老化、芯片击穿。同时，电网瞬时过电压、负荷骤变产生的冲击电流，会造成模块开路损坏，直接导致变流器输出电流畸变，是引发谐波扰动的核心诱因。

二是直流母线电压异常故障。该故障分为过压与欠压两类，高发于风速骤变、电网电压波动工况。过压故障多由制动电阻老化、阻值偏移、制动单元拒动导致，额定工况下直流母线电压为 1100V，故障状态下电压可突破 1200V，触发设备保护停机。欠压故障主要因直流电容老化、容值衰减、传感器信号异常导致，电容长期充放电老化会造成电压储能能力下降，而霍尔传感器掉线、输出信号偏差会引发控制系统误判，触发欠压保护闭锁。

三是传感器与驱动电路故障。电压、电流传感器负责采集运行数据，为控制系统调节策略提供依据，传感器零点漂移、信号失真、线路接触不良，会导致采集数据偏差，造成变流器调制策略失准，输出功率失衡^[2]。驱动电路老化、光耦损坏、供电异常，会导致 IGBT 模块触发信号缺失，出现单相或多相工作异常，引发三相电流不平衡问题。

四是控制系统与并网参数异常故障。变流器控制程序紊乱、参数匹配失调、通讯中断，会导致有功、无功功率调节失效，无法实时跟踪电网负荷变化。风电场多机组并网工况下，各机组控保参数不统一、出力差异化波动，会叠加形成大范围电能质量扰动，加剧电网电压波动与功率振荡。

二、变流器故障诱发电网电能质量扰动机理

风电变流器各类故障并非单纯造成设备停机，而是通过电能变换过程传导扰动，从机组侧扩散至区域电网，诱发多重电能质量问题，各类扰动的形成机理具有明确关联性。

谐波畸变是变流器故障最常见的扰动形式。正常工况下，变流器通过 PWM 调制实现正弦电能输出，谐波含量可控。当 IGBT 模块开路、驱动信号异常时，变流器开关逻辑紊乱，输出电流波

形畸变，产生 3 次、5 次、7 次高频谐波。谐波注入电网后，会增加线路与变压器损耗，造成电力设备发热老化，干扰继电保护装置正常工作，严重时引发保护误动、电网谐振故障。同时，故障状态下变流器高频开关损耗剧增，会衍生高频电磁扰动，进一步恶化电网电能质量。

电压波动与闪变主要由变流器功率调节失效导致。风速随机波动会造成风电机组原始出力不稳定，正常运行时变流器可通过功率闭环调节平抑出力波动。当控制系统故障、直流电压异常时，功率调节功能失效，机组有功、无功功率大幅震荡，直接引发并网点电压幅值周期性波动，超出国标允许范围^[3]。电压频繁波动会造成电网灯具频闪、精密用电设备运行异常，影响区域用电稳定性。

三相电压、电流不平衡问题多由变流器单相故障引发。变流器单路 IGBT 损坏、单相传感器故障、单组驱动电路失效，会导致三相输出电流幅值不一致，电网三相负荷失衡。三相不平衡会造成发电机、变压器负序电流增大，设备发热损耗加剧，同时会影响电网零序保护动作，降低电网运行稳定性。

电压骤升骤降故障高发于电网扰动与变流器保护联动过程。当电网瞬时电压跌落时，变流器若故障导致低电压穿越能力失效，会快速闭锁停机，机组瞬间脱网引发电网电压骤降；而直流母线过压故障触发保护动作时，变流器功率突变，易造成并网点电压骤升，短时间内的电压剧烈波动会冲击电网敏感设备，引发大范围电能质量异常。

三、电能质量扰动综合治理技术方案

针对变流器故障引发的电能质量扰动问题，摒弃传统单一末端治理模式，构建“源头防控－过程抑制－末端补偿”的全维度综合治理体系，从故障预防、扰动抑制、电网补偿三个层面解决电能质量超标问题。

源头防控是从根本减少故障与扰动发生的核心手段。首先优化变流器运行控制策略，升级 PWM 调制算法，引入无功前馈直流电压补偿技术，有效抑制无功功率波动引发的直流电压振荡，实测可将电压动态超调量降低 80% 以上，大幅减少电压异常故障频次。其次统一风电场机组并网控保参数，消除新旧机组、不同工况机组的出力差异化波动，避免扰动叠加效应。同时搭建实时状态监测系统，对变流器直流母线电压、模块温度、输出电流、传感器信号进行全天候采集，通过大数据分析预判设备老化趋势，提前排查潜在故障，实现故障前置防控。

过程抑制聚焦故障发生后的扰动实时管控，阻断扰动扩散。针对变流器故障衍生的高频谐波，在机组控制程序中内置有源滤波子程序，依托机组自身变流器实现谐波就地抵消，减少谐波向电网注入^[4]。针对功率波动问题，优化变流器功率闭环调节逻辑，增设功率缓冲模块，当风速骤变、负荷波动时，通过储能缓冲平抑瞬时功率震荡，保障输出功率平稳。针对单相故障引发的三相不平衡问题，设计容错控制策略，当检测到单路模块异常时，快速调整剩余正常模块的调制参数，实现降额稳定运行，避免三相失衡扰动持续扩散。

末端补偿用于抵消残余电能质量扰动，保障并网指标达标。在风电场并网点分级配置无功补偿装置、有源电力滤波器（APF）与动态电压恢复器（DVR）。APF 可实时检测电网谐波、不平衡分量，动态输出补偿电流，精准抵消系统扰动；DVR 可快速响应电压骤升骤降、电压偏差问题，实时补偿电网电压幅值，提升电网电压稳定性。同时依托 STATCOM 装置实现无功功率动态调节，适配变流器故障工况下的无功缺额，全面优化电网电能质量指标。

四、精细化故障检修技术体系

结合变流器故障特征与扰动机理，制定标准化、精细化检修流程，明确故障排查、维修、校验全流程技术要点，提升检修效率，降低故障复发率。

首先建立分级故障排查机制。依托 SCADA 监测数据与现场故障现象，实现故障快速定位。若监测到谐波超标、电流波形畸变，优先排查 IGBT 功率模块、驱动电路，检测模块导通性能、驱动信号完整性；若出现直流电压过压、欠压故障，重点检测制动电阻阻值、直流电容容值、霍尔传感器工作状态，排查线路接触不良、元件老化问题；若出现功率调节失效、并网异常，重点核查控制系统程序、通讯链路、并网参数匹配性。相较于传统盲目排查模式，分级排查可将故障定位效率提升 60% 以上。

其次规范核心部件检修工艺。功率模块检修需严格执行断电放电流程，直流电容断电后预留充足放电时间，避免高压触电风险，对开路、击穿的模块整体更换，同步检测配套驱动电路、缓冲电路，排除隐性故障^[5]。制动系统检修需定期检测制动电阻阻值，及时更换阻值偏移、老化失效的电阻，升级控制程序增设电压缓冲逻辑，杜绝母线过压故障。传感器检修需进行零点校准、精度校验，修复松动、断线线路，更换信号失真、漂移超标的传感器，保障数据采集精准度。

最后完善检修后调试与预防性维护。故障维修完成后，需开展空载调试、带载调试、并网试验，检测变流器输出波形、电压稳定性、谐波含量、功率调节精度，确保各项指标符合并网标准。建立周期性预防性维护机制，定期清理散热风道灰尘、更换老化散热硅脂，校验控制参数、更新程序版本，定期检测电容、电阻、模块等易损元件性能，提前更换老化部件，从运维层面降低故障发生率。同时建立故障台账，记录故障类型、成因、处置方案，形成运维数据闭环，持续优化检修策略^[6]。

五、工程案例应用分析

某陆上平原风电场装机容量 200MW，采用直驱式风电机组，运行期间多次出现并网谐波超标、电压小幅波动问题，频发机组告警现象，影响电网电能质量。经现场排查，故障核心原因为部分机组变流器制动电阻老化、阻值大幅偏移，直流母线电压波动超标，同时控制程序无电压缓冲逻辑，工况波动下易引发调制失准，衍生谐波与电压扰动，且场内机组控保参数不统一，扰动叠加加剧电能质量问题。

本次采用本文提出的综合治理与检修技术开展整改：一是更换全部老化制动电阻，升级变流器控制程序，增设电压缓冲与无功前馈补偿逻辑，优化 PWM 调制策略；二是统一全场机组并网控保参数，消除机组出力差异化扰动；三是在并网点配置 APF 有源滤波装置与小型 DVR 电压补偿装置，实现末端扰动补偿；四是完成变流器全机组校验调试，建立常态化预防性运维机制。

整改完成后持续监测 3 个月，风电场并网点电能质量指标显著优化，谐波畸变率控制在 3% 以内，符合国家并网标准，电压波动与闪变指标大幅下降，无电压骤升骤降、三相不平衡异常问题，变流器故障复发率降至零，机组运行稳定性、并网安全性显著提升，验证了本文技术方案的实用性与有效性。

六、结论

风电变流器故障是诱发风电并网电能质量扰动的核心诱因，功率模块损坏、直流电压异常、传感器故障、控制策略失准等各类故障，会分别引发谐波畸变、电压波动、三相不平衡、电压骤变等电能质量问题，各类故障与扰动存在明确的耦合关联。本文构建的“源头防控－过程抑制－末端补偿”全维度综合治理体系，可从根本上减少故障发生、阻断扰动扩散、补偿残余扰动，有效优化电网电能质量。配套的分级排查、标准化检修、预防性维护技术体系，能够精准高效完成变流器故障处置，降低故障复发率。

工程实践表明，该套技术方案适配风电场复杂运行工况，可有效解决变流器故障引发的电能质量问题，提升风电并网稳定性与设备运维水平。后续可结合人工智能故障诊断技术，进一步优化变流器状态预判与扰动抑制策略，适配高比例风电并网的新型电力系统运行需求。

参考文献

- [1] 王德胜, 颜湘武, 刘辉, 等. 基于动态无功支撑的全功率变流风电机组高电压穿越改进控制 [J]. 中国电机工程学报, 2022(003): 42.
- [2] 沈湜, 赵晋斌, 潘超, 等. 海上风电变流器故障定位与重构运行策略 [J]. 电力电子技术, 2025, 59(9): 75-80.
- [3] 罗炜, 史尤杰, 余雪莹, 等. 风电机组变流器对海上风电场可靠性的影响 [J]. 南方电网技术, 2021(011): 15.
- [4] 傅晓军, 吴豪, 刘畅. 某型风机变流器 IGBT 模块故障的应急处理方法探讨 [J]. 现代工业和信息化, 2020(12): 152-154.
- [5] 张梦阳, 刘毅力, 朱晓龙, 等. 基于自抗扰技术的直驱风机高电压穿越控制策略 [J]. 分布式能源, 2023, 8(5): 1-9.
- [6] 沈阳武, 王世伟, 张斌, 等. 双馈风力发电变流器谐波建模与特性分析 [J]. 电力系统及其自动化学报, 2020, 32(9): 8.